

改进的 GSI 系统在洞室围岩力学参数识别中的应用

眭敏磊,张发明

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对传统 GSI 系统未考虑岩体中结构面产状对工程岩体参数的影响这一问题,结合国内相关工程岩体规范和句容抽水蓄能电站工程二号平硐,根据结构面与洞轴线的空间关系,确定其对结构面条件参数 SCR 的影响系数,改进了 SCR 的统计方法,确定围岩的等效物理力学参数。研究表明:改进之后的 GSI 体系求解围岩的等效弹性模量和粘聚力分别减小了约 22.3% 和 8.3% 的误差。

关键词:地质强度指标; SCR; 结构面产状; 洞室围岩; 参数识别

中图分类号:P554

文献标识码:A

Application of modified GSI system on identification of mechanical parameters for surrounding rock in the tunnel

SUI Min-lei, ZHANG Fa-ming

(College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: While the influence of orientation of structure plane on parameters of rock mass is neglected in the traditional GSI system. In this paper, as a case of cavern II in the Jurong Pumped-storage Hydroplant Project, the influence coefficient between the distribution of structure plane and surface condition rating (SCR) of surrounding rock is calculated based on the space relation of structure plane and axis of cavern; the statistical method of SCR of surrounding rock is modified, and the experiential estimates of equivalent physical mechanic parameters of surrounding rock mass are acquired. The investigations show that the calculative errors of equivalent deformation modulus and cohesive strength in surrounding rock based on modified GSI system decreased by about 22.3%, 8.3% respectively.

Key words: geological strength index(GSI); surface condition rating(SCR); orientation of structure plane; cavern surrounding rock; parameter identification

在地下工程中,工程岩体的物理力学指标的选择是需要慎重考虑的,岩体的变形和强度特性由诸多因素控制,包括岩石强度、岩体完整程度、地下水、初始应力状态,结构面与洞轴线的空间关系、结构面状态等。结构面广泛存在于岩体中,不同的结构面几何特征和性状对岩体的影响程度不同,相同的结构面特征对不同岩性的岩体的影响也不尽相同。为了在工程中经济合理地进行岩体开挖和支护设计、安全施工,必须对工程岩体稳定性作出评价。对于分析判断工程岩体稳定性的数值计算和物理模型试验,需要获得岩体的物理力

学参数。经验公式法是建立在以往大量工程实践经验 and 岩石力学室内试验的基础上的一种简易方法,只需少量的地质勘察和岩石力学试验就能确定工程岩体级别,估算出物理力学参数,确定工程岩体稳定性,因而被普遍接受。GSI 体系是 Hoek^[1]于 1995 年提出工程岩体分类系统。1998 年, Hoek 和 Marnio^[2]在 GSI 表进行增加且对 GSI 岩体分类表进行量化,使其更方便使用。李达等^[3]对 GSI 体系进行修正,主要通过结构面产状对岩体结构等级 SR 的修正,引入结构面产状对 GSI 取值的影响。笔者认为结构面产状对岩体力

学性质的影响,可能是通过对结构面条件等级的影响,来达到对 GSI 体系的修正。而在传统的 GSI 体系中,未考虑结构面组合对 GSI 取值的影响,显然结构面的产状与其他几何特征一样都是对岩体的变形和强度有重要影响的,本文拟通过结构面产状对结构面条件等级 SCR 的修正,以达到对 GSI 取值的修正。

2 GSI 体系与改进的 GSI 体系

2.1 传统 GSI 体系

GSI(Geological Strength Index)地质强度指标,通过岩体结构特征(SR)与结构面条件(SCR)特性(粗糙度、充填、风化程度等)的描述对 SR 和 SCR 分别进行评分,进而评价岩体质量。在 GSI 体系中(Hoek et al. 1998),岩体结构被划分为 4 个等级,结构面表面条件划分为 5 个等级,缺乏定量标准导致在工程中应用性较差。Sonmez^[4]提出基于 GSI 体系中的岩体结构等级 SR 和结构面表面特性的定量描述方法,且拟合了 SR 与体积节理密度 J_v 的定量关系:

$$SR = -17.5 \ln J_v + 79.8 \quad (1)$$

而结构面的条件特征 SCR 由 3 个部分组成: $SCR = R_r + R_w + R_f$,其中 R_r 、 R_w 、 R_f 分别为粗糙度、风化程度和充填。Hoek 和 Brown 基于 Griffith 的断裂理论,通过大量三轴试验资料和岩体现场试验结果的分析统计,提出广义 Hoek - Brown 强度准则。Hoek^[5]考虑岩体扰动因素,提出了根据 GSI 值确定 H - B 参数的关系式,之后又补充了岩体变形模量与 GSI 的关系式^[6]。

2.2 改进的 GSI 体系

2.2.1 SR 的计算

岩体结构特征等级 (Structure Rating) 是对岩体内结构面组成的岩体结构进行评分,SR 可以根据体密度 J_v 、块体大小 V_b 或 RQD 计算得出。体积节理数 J_v 指单位体积岩体内的节理总数,是 (IS-RM) 国际岩石力学委员会推荐来描述岩体节理化程度和单元岩体块度的指标之一。在工程应用中,直接求得 J_v 困难,通常是通过测线法和测窗法先测得结构面的线密度 (J_l) 和面密度 (J_a)。根据已有的线密度资料,可参照工程岩体分级标准 (GB50218 - 94) 建议的体密度与线密度的关系式:

$$J_v = J_{l1} + J_{l2} + \dots + J_{ln} + J_k \quad (2)$$

式中, J_{ln} 为第 n 组节理组的线密度,即每米长测线上的节理数; J_k 为每立方米非成组节理条数。Palmström^[6]通过大量的实测数据,得出节理面密度和体积节理数间存在较好的线性相关性,即:

$$J_v = K \times Na \quad (3)$$

式中, Na 为面密度; K 为相关系数,取值在 1 ~ 2.5 之间变化,均值为 1.5,当测面与主要节理组走向平行时, K 值取 2.5; 主要节理组走向与测面锐夹角为 φ ,由以上条件拟合出相关系数和夹角的关系曲线得出 K 关于夹角 φ 的关系式:

$$K = 0.4053\varphi^2 - 1.5915\varphi + 2.5 \quad (4)$$

笔者认为岩体等效影响参数 K' 可通过各组节理组的 K_i 值取加权平均值,即:

$$K' = (n_1 \times K_1 + n_2 \times K_2 + \dots + n_n \times K_n) / Na \quad (5)$$

式中, n 为岩体中节理组数; n_i 为第 i 组节理组节理面密度。 J_v 可通过下式求解:

$$J_v = K' \times Na \quad (6)$$

2.2.2 SCR 值计算的改进

GSI 体系未考虑结构面组合对工程岩体的影响,传统确定 SCR 取值的方法^[7]没有考虑岩体开挖面和建筑物之间的空间效应。事实上由于结构面产状不同,结构面与洞轴线的组合关系不同,对工程岩体稳定的影响程度也不同。

在结构面产状分组的基础上,按其倾角和倾向进行进一步分组,参照工程岩体分级标准 (GB50218 - 94) 对主要软弱结构面影响修正的相关建议,确定结构面组产状对 SCR 的影响系数 A_i , A_i 为与岩体基本质量 BQ 相关的系数。

A_i 为节理组产状对 SCR 的影响因子,根据结构面与洞室轴线夹角越小,相对开挖面倾向外,中缓倾角的结构面对围岩力学参数影响较大的原理,从而通过 A_i 修正结构面条件参数 SCR,影响系数越大,该组结构面的 SCR 越大。则各组结构面的评分取值分别为 $R_{wi}' = R_{wi} \times A_i$, $R_{fi}' = R_{fi} \times A_i$, $R_{ri}' = R_{ri} \times A_i$ 。即第 i 组结构面的 SCR 值为 $SCR_i = R_{wi}' + R_{fi}' + R_{ri}'$ 。

$$SCR_i = (R_{wi} + R_{fi} + R_{ri}) \times A_i \quad (7)$$

$$SCR = \sum (SCR_i \times n_i), \sum n_i = 1 \quad (8)$$

式中 k_i 为第 i 组节理组的产状修正系数; n_i 为第 i 组节理组占总节理数的比例。

表 1 SCR 修正系数取值及结构面统计

Tab.1 Modified parameters of SCR and statistics of structure planes

参数	结构面统计值								
	<30°			30~60°			>60°		
走向与洞轴线夹角	<30°	30~75°	>75°	<30°	30~75°	>75°	<30°	30~75°	>75°
倾角	<30°	30~75°	>75°	<30°	30~75°	>75°	<30°	30~75°	>75°
影响系数 A_i	0.92	0.88	0.90	0.96	0.92	0.94	1	0.96	0.98
结构面条数	67	218	39	145	366	9	89	393	16

表 2 各组结构面表面特征 SCR 值统计

Tab.2 Statistics results of surface characteristics rating(SCR) of structure planes

走向分组 i	①	②	③
R_r	5	5	3
R_w	6	3	2
R_f	6	4	2
产状影响系数 A_i	0.89	0.93	0.97
SCR_i	15.14	11.18	6.77

表 3 不同修正条件下 GSI 和强度参数计算结果

Tab.3 Strength parameters of H-B and M-C failure criterion and deformation modulus

计算体系	传统 GSI 计算结果			改进 SR 计算结果			改进 SCR 计算结果		
GSI	73.7			70.8			67		
H-B 参数	mb	s	a	mb	s	a	m_b	s	a
	6.84	0.022	0.5	5.83	0.015	0.5	5.73	0.014	0.5
M-C 参数	E_m/Gpa	C/MPa	$\Phi/^\circ$	E_m/Gpa	C/MPa	$\Phi/^\circ$	E_m/Gpa	C/MPa	$\Phi/^\circ$
	22.71	2.452	54.6	20.25	2.246	53.5	18.89	2.025	52

文献[3]在文中所取的结构面统计结果见表 1, 基于分组统计 J_v 的思路, 可得岩体等效影响参数 K' 取值为 $K' = 1.503$, 计算得结构面体密度 $J_v = 1.01$ 条/ m^3 , 将 J_v 代入式(1)中可得 $SR = 79.6$ 。根据测窗内结构面性质的描述和其他地质编录资料结果分析, 确定各组结构面的条件评分, 代入式(7)、(8)分别确定产状对其影响系数 A_i 及其 SCR 值如表 2 所示, 代入式(8)得 $SCR = 10.5$ 。而传统的计算 SCR 的方法得出结果为 12。

根据 Sonmez^[4]绘制的 GSI 体系量化图, 可得 SCR 未改进时, $GSI = 73.70$; 根据文献[3]中的 SR 改进法计算得 $GSI = 70.8$; SCR 改进后, $GSI = 66.00$ 。平均单轴抗压强度为 79.74 MPa, 岩体扰动因子 D 取 0.7, 岩体材料参数 m_i 取 29, 可计算出围岩的 H-B 强度参数、M-C 强度参数和岩体变形模量如表 3 所示。

对比可以发现, 改进 SCR 法相对于改进 SR 的计算结果偏小, 而二者相较于传统的 GSI 体系计算结果来说都是较小的, 这也说明结构面的组合产状存在着对岩体强度的弱化。对比文献[3]中反演的结果, $c = 2$ MPa, $\varphi = 58^\circ$ 。可知 SCR 改进方法相对于 SR 改进方法, 粘聚力 c 更接近于反演值, 误差减小了约 10%, 而摩擦角 φ 相对于反演值

有微小的偏移。

3 工程应用

句容抽水蓄能电站上水库正常蓄水位 267.00 m, 死水位 239.00 m, 总库容 $1\ 706 \times 10^4$ m^3 。坝型为钢筋混凝土面板堆石坝, 主坝最大坝高约 175.00 m, 坝顶长度为 779.68 m。输水发电系统位于仑山山体内部, 设计三洞六机。隧洞总长 1 337.80 ~ 1 372.10 m, 静水头差最大为 201 m, 除引水上平洞及部分尾水洞外, 均采用钢板衬砌。地下厂房 245.50 m \times 25.30 m \times 57.20 m (长 \times 宽 \times 高), 位于 -10 m 高程, 总装机容量 6×225 MW。

根据《句容抽水蓄能电站预可行性研究阶段专题研究报告》, 就整体而言, 输水线路由上库左岸穿过仑山主峰后直达下水库右岸, 轴线方向为 $N42^\circ E \rightarrow N43^\circ E \rightarrow N28^\circ E$, 沿线山体雄厚, 冲沟不发育, 仅北西侧发育一条深切冲沟 (F8 断裂发育带), 沟向近 SN, 沟源与输水线相距约 200 m, 地面高程为 80 ~ 400 m, 上水库进/出水口坡度较陡为 $35 \sim 40^\circ$, 主峰至下水库进/出水口坡度为 $25 \sim 30^\circ$, 沿线基岩大范围裸露, 呈弱风化 ~ 微风化状。不良物理地质现象不发育, 地表植被发育。

PD2 洞轴线走向为 $S28^\circ W$, 在平硐 PD2 内发

表4 结构面走向与洞轴线走向夹角及其影响参数的估计

Tab.4 The angle between strike of structure planes and axis of tunnel and estimation of modified parameters

结构面组	结构面与洞轴线走向间夹角/ $^{\circ}$		倾角/ $^{\circ}$		影响系数 A_i	结构面条数
1	77.15	>60	85.7	>75	0.97	160
2	68	30~60	74.5	30~75	0.9	56
3	48.5	30~60	76.5	>75	0.92	26
4	82	>60	74	30~75	0.95	31
5	65	30~60	80	>75	0.92	45
6	30.5	30~60	68	30~75	0.9	14
7	12	<30	69	30~75	0.85	19
8	49.5	30~60	76.5	>75	0.92	65

表5 H-B 和 M-C 参数

Tab.5 Strength parameters of H-B and M-C failure criterion

计算体系	传统 GSI 计算结果			改进 SCR 计算结果		
GSI	56.7			53.5		
H-B 参数	mb	s	a	mb	s	a
不计扰动	2.13	0.0081	0.5	1.9	0.0057	0.5
考虑扰动	1.27	0.0031	0.5	1.092	0.002	0.5
M-C 参数	E_m/Gpa	C/MPa	$\Phi/^{\circ}$	E_m/Gpa	C/MPa	$\Phi/^{\circ}$
不计扰动	19.65	1.159	43.54	16.6	1.073	42.65
考虑扰动	9.9	0.928	39.27	8.12	0.856	38

育有 8 组优势结构面,其走向与洞轴线的夹角及其倾角如表 4 所示。采样区域岩体主要以 III 类为主,取其岩体基本质量平均值 400,求得相应的结构面参数影响系数 A_i 详见表 4。

根据结构面性状描述,确定各组结构面的条件评分,及其产状与洞轴线之间的关系确定结构面产状的修正系数 A_i ,然后确定各组结构面的 SCR 值,将各组结构面的 SCR_i 评分值代入式(8)得 $SCR = 12.95$ 。而传统的计算 SCR 的方法得出的是 $SCR = 13.75$ 。

围岩岩性主要为白云岩及灰岩,平均单轴抗压强度为 46 MPa,平均岩体变形模量为 44.1 GPa,主厂房爆破开挖效果良好,扰动系数取 0.5, H-B 常参数 m_i 为 10,结构面间距统计置信区间为 43~53 cm,根据 Palmström^[5] 总结的 SR 与 J_v 、 V_b 、 S 及 RQD 的关系式及图表,估算得 $SR \approx 47$ 。根据 Sonmez^[4] 绘制的 GSI 体系量化图,可得 SCR 未改进时, $GSI = 56.70$; SCR 改进后, $GSI = 53.50$ 。然后根据 Hoek-Brown 破坏准则 2002 年的最新修正,确定 σ_{3max} 约为 3 MPa,依据 GSI 值与 H-B 参数之间的关系式,计算出围岩的 H-B 强度参数如表 5 所示,结合 Mohr-Coulomb 准则,可求得围岩的抗剪强度参数,在低围压下进行回归分析,得到围岩抗剪强度参数如表 5 所示。

PD2 主要围岩为白云岩及灰岩,基于现场变

形试验和室内试验(句容抽水蓄能电站预可行性研究阶段专题研究报告)给出隧洞围岩的力学指标建议值 $E_m = 8.0 \text{ GPa}$, $c = 0.87 \text{ MPa}$, $\varphi = 38.5^{\circ}$ 。

比较表 5 和隧洞围岩的力学指标建议值可以发现:相较于建议值,未改进的 GSI 体系计算的变形模量和粘聚力结果偏大;改进的 GSI 体系则相应的分别减小约 22.3% 和 8.3%;而摩擦角比较相近的。若按传统的 GSI 体系对围岩的物理力学参数进行估计,得到的值需进行折减,经过改进之后得到明显改善。开挖扰动明显弱化了岩体力学参数,比较分析改进 SCR 时的结果可以发现:相对于不考虑开挖扰动时围岩的计算结果,考虑扰动时的围岩等效变形模量的影响最大,减小约 50%, c 减小了约 20%,而 φ 值变化较小,亦减小了约 10%。

4 结论

(1) 结构面的产状对岩体整体强度的影响应是通过对于岩体结构面条件 SCR 的弱化,以达到对 GSI 取值的影响。

(2) 在地下工程中,岩体结构面条件 SCR 应考虑结构面产状与开挖面的空间关系。其中与洞轴线小角度相交,中缓倾角的结构面对围岩变形和强度影响最大,不利于围岩稳定。

(下转第 35 页)

4 结论

该算法计算时可以灵活调整 β 值和各材料参数,得到多种满足设计要求的方案,然后通过对比得到最合理方案,设计完成后不需要再进行可靠度评价。本文考虑各变量之间独立不相关的情况,得到简支梁选材配筋的三种方案,并同常规算法比较后发现基于可靠度理论的算法在实现结构的经济化设计领域具有重要应用价值。理论上只要能够建立正确的受力模型,准确分析抗力 R 和效应 S 表达式中的变量分布类型及其关系,那么该方法还可应用于更复杂的结构设计。

参考文献:

- [1] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 李国强,黄宏伟,郑步全. 工程结构荷载与可靠度设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 龙驭球,包世华. 结构力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社,1998.
- [4] SL191-2008, 水工混凝土结构设计规范[S].
- [5] ISO/DIS2394, General principles on reliability for structures[S].
- [6] 苏怀智,刘红萍. 高重力坝抗滑稳定安全度分析[J]. 水利水电科技进展,2011(4):20-23.

(责任编辑 王利君)

(上接第23页)

参考文献:

- [1] 陈厚群. 混凝土大坝抗震中的力学问题[J]. 力学与实践, 2006, 28(02): 1-8.
- [2] 楼梦麟,殷琳. 关于高土坝地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 103-107.
- [3] 陶警圆. 阻尼模型对土石坝动力响应的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [4] 楼梦麟,邵新刚. 深覆盖土层 Rayleigh 阻尼矩阵建模问题的讨论[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(07): 1272-1279.
- [5] 楼梦麟,邵新刚. 土层地震反应显式计算中阻尼矩阵系数的选取[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(8): 1126-1132.
- [6] 楼梦麟,潘旦光. 滞后阻尼在土层时域分析中的应用

[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004(03): 281-285.

- [7] 楼梦麟,李遇春,李南生,等. 深覆盖土层地震反应分析中的若干问题[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(4): 427-432.
- [8] 杨燕,楼梦麟. 汶川地震中远场深覆盖土层动力反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(4): 462-468.
- [9] 殷琳. 地下结构振动台模型试验与数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [10] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [11] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. McGraw-Hill New York, 1993.

(责任编辑 王利君)

(上接第31页)

(3)通过引入结构面产状组合对GSI体系取值的影响,能较为准确地进行节理化岩体强度参数及岩体变形模量的求取,考虑扰动时改进的GSI计算结果与建议值较为接近。

参考文献:

- [1] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. ISRM News Journal, 1994, 2(2): 4-16.
- [2] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens schist formation[J]. Bull. Eng. Geol. Environ, 1998, 57(2): 151-160.
- [3] 黄达,黄润秋,张永兴. 基于改进GSI体系确定三峡地下厂房围岩等效变形模量及强度[J]. 中国地质大学学报, 2008, 34(6): 1030-1036.
- [4] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, ULUSAY R, et al. Indirect

determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 2004(41): 849-857.

- [5] PALMSTROM A. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering—Part 1: The development of the rock mass index (RMI) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 175-188.
- [6] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(8): 1165-1168.
- [7] HOEK E, CARRANZA T C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion [C]//2002 edition. Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, 2002: 267-273.

(责任编辑 王利君)